Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 23, No. 3, pp. 289~294, June, 2011
DOI 10.4334/JKCI.2011.23.3.289

건조수축에 따른 균열 방지를 위한 콘크리트 슬래브의 정량적 줄눈 간격 산정

이수진[1)] · 이회근[2)] · 이승훈[2)] · 원종필[1)*]

[1)]건국대학교 사회환경시스템공학과 [2)]삼성물산(주) 건설부문 기술연구센터 기반기술연구소

Quantitative Estimation of Joint Spacing for Concrete Slab to Prevent Cracking of Drying Shrinkage

Su-Jin Lee,[1)] Hoi-Keun Lee,[2)] Seung-Hoon Lee,[2)] and Jong-Pil Won[1)*]

[1)]Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
[2)]Samsung C&T Corporation, Seoul 137-956, Korea

ABSTRACT The installation of joint is to prevent random cracking due to drying shrinkage stress of concrete slab. However contraction joint spacing is empirically implemented into slab constructions without detail calculation based on quantitative criteria. In this study, shrinkage strain of concrete due to concrete shrinkage stress was measured to suggest joint spacing based on the study results. The test environmental conditions were applied temperature of 15°C and relative humidity of 60%. The design compressive strength used was 30 MPa and 40 MPa, which are currently used in concrete slab designs. The drying shrinkage test result was applied to drying shrinkage models (ACI 209R, CEB MC 90, B3, GL 2000 and Sakata). The results showed that the most appropriate model was ACI 209R model. Based on the research findings, quantitative contraction joint spacing locations were calculated.

Keywords : concrete drying shrinkage, slab, joint spacing

1. 서 론

콘크리트 구조물에 발생하는 균열의 내부 요인은 건조수축, 수화열, 이상 응결, 알칼리-골재 반응 등이고 외부 요인은 과 하중, 외부의 온도 변화, 동결 융해, 부등 침하 등이 있다. 이와 같은 균열 발생 요인 중 건조수축이나 온도 변화에 의한 균열 발생은 전체 균열의 90%이상을 차지하고 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 건조수축을 예측하는 가장 큰 목적은 수축 거동을 미리 파악하여 이로 인한 균열을 방지하기 위함이다. 특히 콘크리트 슬래브의 경우 외부의 하중, 온도 변화 및 수분 등의 영향을 가장 크게 받는 구조물로 수축 거동의 예측이 매우 중요하다.

콘크리트 슬래브는 타설 후 외부와 접하면서 건조되기 시작한다. 건조가 시작된 외부의 콘크리트는 수축하는 반면 그 내부는 수분을 가지고 있어 외부의 수축 작용을 구속하게 된다. 이로 인해 외부에 노출된 콘크리트의 표면에는 인장응력이 발생하고 이 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하게 되면 균열이 발생하게 된다.[1)]

콘크리트 슬래브에 발생하는 균열은 심각한 구조적 문제를 야기할 수도 있으며 외관의 손상은 물론 균열로 인해 철근이 대기나 습기에 노출될 경우 부식을 유발하여 내구성의 저하를 야기하기도 한다. 이에 슬래브 내부의 수축으로 인한 응력의 크기를 적정값으로 제안하기 위해 최대 건조수축에 도달하지 않는 범위 내에서 줄눈을 설치하여 슬래브 내의 인장응력의 크기를 제어한다.[2)] 그러나 구조적으로 줄눈 자체가 취약부가 되어 콘크리트 슬래브의 조기 파손의 원인이 된다. 따라서 불필요한 균열의 발생은 억제하면서 구조적으로 문제를 야기시키지 않는 최대 줄눈 간격 설계가 필요하다.

국내의 경우 구조용 무근 콘크리트에 대해 줄눈 설계를 실시하고 있으나 그 간격이 명확하지 않고 경험적으로 이루어지고 있는 실정이다.[3)] 한국도로공사의 경우 AASHTO의 규정을 적용하여 무근 콘크리트 슬래브의 줄눈 간격을 개략적으로 설정하고 있다. 줄눈 간격은 슬래브 두께(cm)의 0.24배(m)로 하고 그 값을 초과하지 않는 범위 내로 정하고 있다.[4)] 또한 도로설계편람에서도 구체적인 산출 근거 없이 일반적으로 5 m로 나누고 있다.[5)] 외국의 경우도 마찬가지로 경험적으로 나누고 있으며 수축 줄눈에 대한 간격을 Table 1과 같이 제시하고 있다.[6)] 지반위에 놓인 슬래브(slabs on grade)의 경우 노상과 접해있어 콘크리트의 건조수축 뿐만 아니라 노상의 강도, 마찰 계수, 연속성, 시공 방법 및 품질과 재하되는 하중의 크기 및 위치 등에 의한 영향도 함께 받는다. 그러나 이러한 인자들에 의한 노상의 변형은 슬래브의 컬링으로 인한 응력에 비해 상대적으로 자유롭다고 가정하고 있다. 이로 인해 지반위에 놓인 무근 콘크리트 슬래브의 건조수

*Corresponding author E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr
Received December 2, 2010, Revised February 17, 2011, Accepted April 8, 2011
ⓒ2011 by Korea Concrete Institute

Table 1 Contraction joint spacing

Author	Spacing
Merrill[26]	· 6 m for wall with frequent opening · 7.5 m in solid walls
Fintel[27]	· 4.5 to 6 m for wall and slab on grade
Wood[28]	· 6 to 9 m for walls
PCA[25]	· 6 to 7.5 m for walls depending on number of opening
ACI 302.1R[9]	· 4.5 to 6 m recommended until 302.1R-89, then changed to 24 to times slab thickness
ACI 350R-83[7]	· 9 m in sanitary structure
ACI 350R[7]	· Joint spacing varies with amount and grade of shrinkage and temp. reinforcement
ACI 224R-92[6]	· 1 to 3 times the height of the wall in solid walls

축에 의한 영향만을 고려하고 최대 줄눈 간격을 슬래브 두께(mm)의 24~36배로 나누고 있다.[7] American Concrete Pavement Association(ACPA)에서는 지반위에 놓인 무근 콘크리트의 대표적인 예로 콘크리트 포장 도로를 들고 있고 일반적으로 줄눈 간격은 슬래브 두께(mm)의 24~30배로 나누고 있으나 최대 줄눈 간격이 4.5 m를 넘지 못하도록 규정하고 있다.[8]

주차장 바닥 슬래브의 경우 지반과 접하는 슬래브와 층과 층을 이루는 상부 슬래브(suspended slab)로 나눌 수 있다. 먼저 지반과 접하는 슬래브의 경우 건조수축으로 인한 무작위 균열을 방지하기 위하여 수축 줄눈을 두게 되는데 ACI 302.1R에서는 슬래브 두께의 24~36배로 나누고 있으며 최대 줄눈 간격이 5.5 m를 넘지 못하도록 규정하고 있다.[9] 주차장과 같은 건축 구조물은 토목 구조물에 비해 받는 하중의 크기가 작아 하중의 재하 정도에 따라 가벼움(light), 중간(medium) 및 무거움(heavy)으로 나누어 슬래브의 두께를 각각 100 mm, 130 mm 및 150 mm로 권장하고 있다.[10] 따라서 그 최대 줄눈 간격을 슬래브 두께의 36배로 계산했을 때 각각 3.6 m, 4.5 m 및 5.4 m로 ACI 302.1R 규정과 같이 5.5 m를 넘지 못한다. 반면 층과 층을 이루는 상부 슬래브의 시공 줄눈부는 엔지니어가 그 위치를 결정하며 일반적으로 많이 적용하는 기준을 따른다고 명시되어 있다.[9]

이와 같이 앞서 언급된 지반위에 놓인 콘크리트 슬래브의 줄눈 간격 규정은 모두 구체적인 산출 근거 없이 경험적으로 나누어진 기준이다. 따라서 이 연구에서는 2000~2009년 서울지역 연평균 온도 및 습도를 기준으로 한 환경 인자에 노출된 콘크리트 슬래브의 건조수축 시험을 실시하여 국내 실정에 맞는 줄눈 간격의 정량적인 산정을 제시하고자 한다.

2. 콘크리트의 건조수축 거동

2.1 콘크리트 건조수축 예측 모델

오랜 기간 동안 콘크리트의 건조수축에 대한 관계를 규명하고자 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어왔다. 콘크리트의 건조수축량을 예측하기 위한 모델은 매우 많으나 아직까지 콘크리트의 수축과 크리프에 대한 현상을 명확하게 규명하지 못하고 있다.[11] 그 중 일반적으로 널리 사용되는 예측 모델은 American Concrete Institute의 ACI 209R 모델,[12] Comite Euro International Du Beton의 CEB Model Code 1990,[13] Bazant의 B3모델,[14] GL2000 모델[15] 및 Sakata 모델[16]로 언급한 순서대로 식 (1)에서 식 (5)까지 나타내었다. 이 밖에 많은 모델들이 제안되어 사용되고 있지만 이들은 ACI 209R, CEB MC 90 및 B3와 같은 세 가지 모델 중 적어도 한 가지를 선택하여 실정에 맞게 수정한 것들이 대부분이다.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{(t - t_0)}{35 + (t - t_0)} \varepsilon_{sh\infty} \tag{1}$$

여기서, $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 수축 변형량 (in./in.)
t : 재령 (일)
t_0 : 건조가 시작되는 재령 (일)
$\varepsilon_{sh\infty}$: 극한 수축 변형량

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{CSO}\beta_S(t - t_0) \tag{2}$$

여기서, $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 수축 변형량 (mm/mm)
ε_{CSO} : 개념 수축 계수
$\beta_s(t - t_0)$: 시간에 따른 수축 계수

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = -\varepsilon_{sh\infty}K_h S(t) \tag{3}$$

여기서, $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 수축 변형량 (in./in.)
$\varepsilon_{sh\infty}$: 극한 수축 변형량 (in./in.)
K_h : 상대습도 인자
$S(t)$: 수축에 대한 시간 함수

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{shu}\beta(h)\beta(t) \tag{4}$$

여기서, ε_{sh} : 수축 변형량 (in./in.)
ε_{shu} : 극한 수축 변형량 (in./in.)
$\beta(h)$: 상대습도 보정계수
$\beta(t)$: 건조 시간 보정계수

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty}[1 - \exp - 0.108(t - t_0)^{0.56}] \tag{5}$$

여기서, $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 수축 변형량 (in./in.)
$\varepsilon_{sh\infty}$: 극한 수축 변형량 (in./in.)
t : 재령 (일)
t_0 : 건조가 시작되는 재령 (일)

콘크리트의 건조수축을 예측하는 방법은 크게 경험적 방법과 해석적 방법으로 나누어진다. 경험적인 접근 방법은 재령에 따른 시험편을 많이 만들어 실험값에 근거

하는 방법이고 해석적인 방법은 가정된 콘크리트 크리프와 수축 거동을 지배하는 미분 방정식을 통한 시간 함수를 이용하는 방법이다.

ACI 209R 모델은 대표적인 경험적인 접근 방법에 의한 모델로 양생 조건, 하중이 가해지는 시간, 배합비 및 외기의 온·습도를 고려하여 수축의 극한 변형량을 예측한다.[12,17] 이는 실제 실험 결과를 바탕으로 해석적 방법으로 접근한 B3모델에 비해 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다.[18] 그러나 ACI 209R 모델의 경우 미국뿐만이 아니라 캐나다, 뉴질랜드, 호주 등의 building code에 포함되어 널리 사용되는 모델이다.[19] 실제 1999년 이전에는 국내에서도 사용되었으나 개정된 콘크리트구조설계기준에서는 CEB MC 90 모델의 규정을 따르고 있다. CEB MC 90 모델도 경험적인 모델로 유럽을 중심으로 실시한 실험 결과를 바탕으로 정립되었다. ACI 209R 모델과 그 개념이 유사하며 양생 기간 및 조건, 평균 상대 습도, 부재의 크기를 고려한다.[13,17] 그러나 국내에서 사용하는 시멘트의 종류 및 그 사용량이 달라 많은 오차가 있을 것으로 판단된다.[20] B3 모델은 서로 다른 실험실에서 다양한 콘크리트에 대하여 실험한 결과를 체계적으로 정리하여 수치 해석적으로 제안한 예측식이다. B3 모델에서 건조수축은 확산 이론에 근거를 두고 있으며 이전의 BP 모델이나 BP-KX 모델보다 간단하고 합리적이다.[17] 또한 ACI 209R 모델, CEB MC 90 모델에서 고려하지 못했던 콘크리트의 수축에 영향을 미치는 물리적인 현상을 잘 설명하고 있는 모델이다.[11] 콘크리트 배합비에 따른 설계강도가 이 모델의 중요한 인자이고 외기 조건, 하중 재하시기, 양생 조건, 재령 28일의 탄성계수, 시편의 크기 및 모양을 고려하는 가장 복잡한 모델이다. GL 2000모델은 CEB MC 90 모델의 영향을 받은 경험적인 모델로 초기 하중 재하시 음수값인 릴랙세이션에 대한 보정을 가능하게 발전시킨 모델이다.[17,19] GL 2000 모델은 평균 압축강도를 이용하여 수축과 크리프를 계산하는 형태로 콘크리트가 노출된 외기와 무관하게 적용할 수 있다. Sakata 모델은 실험 데이터를 통계적으로 분석하여 정립된 예측식으로 일본 토목학회에서 적용하고 있는 모델이다.[16] 다른 모델과 달리 계산식을 이용하지 않고 직접 상대습도 값을 적용함으로써 외부 환경에 유동적인 모델이다. 그러나 위에서 언급한 대표적인 모델 이외의 오래된 경험적 모델들과 같이 한계가 있어 적용하지 않고 있다.[21]

그러나 이 모델들에 의해 예측된 건조수축량은 국내 실정과는 달라 실제 실험값에 비해 높거나 낮게 예측되는 경우가 많다. 따라서 이 연구에서는 국내의 환경 조건을 적용하여 건조수축 시험을 실시하였다. 또한 이를 통해 콘크리트 건조수축의 정량적인 줄눈 간격을 산정하고자 한다.

2.2 환경 인자

이 연구에 적용된 외기 조건은 2000~2009년 서울 지역의 연평균 기온 및 습도 중 가장 많은 빈도수를 나타낸 환경 조건으로 하였다. 하절기 및 동절기를 제외하고 가장 많은 빈도수를 나타낸 외기 조건은 온도 15°C, 상대습도 60%이다.

2.3 설계 강도의 영향

콘크리트 슬래브의 건조 수축량을 측정하기 위해 실제 현장에서 가장 많이 적용되고 있는 설계 강도 30 MPa 및 40 MPa을 사용하였다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 180 mm, 공기량은 4%로 고정하였다. 목표 슬럼프와 공기량을 확보하기 위하여 폴리카본산계의 고유동화제를 첨가하였으며 소요의 공기량 확보를 위해 공기 연행제를 사용하였다. 실험에 사용된 배합비는 Table 2에 나타내었다.

2.4 건조수축 측정

콘크리트 건조수축 실험은 KS F 2424 규정에 따라 100 × 100 × 400 mm의 각주형 시험체을 사용하였고 시험편 내부에 매립된 변형률 게이지는 일본 T사의 PMFL-60-2LT를 이용하여 변형률 값을 자동 측정하였다. 이때 매립형 변형률 게이지는 시험편 상하부의 불균등 건조수축을 방지하기 위해 시험편의 정중앙에 설치하였다. 배합별로 2개씩 2회 반복하여 시험편을 제작하였다. 측정은 타설 직후 실시하였으며 초기 24시간 동안의 콘크리트의 수축 또는 팽창을 살펴본 후 재령 1일 이후 재령 5일, 7일의 건조수축량을 측정하였다. 재령 7일 이후에는 7일 간격으로 재령 56일까지 측정하였다. Fig. 1은 온도 15°C, 상대습도 60%의 항온 항습 챔버 내에 있는 시험편의 건조수축을 측정하는 모습이다.

3. 콘크리트 건조수축의 평가

3.1 실험 결과

Fig. 2는 온도 15°C, 상대습도 60%에 노출된 콘크리트

Table 2 Mixture proportion and environmental condition (kg/m^3)

Environmental condition	Mix. type	w/c (%)	S/a (%)	W	C	S	G
15°C RH 60%	30-15/60	42	45	172	410	775	965
	40-15/60	38	45	168	442	767	956

Fig. 1 Measuring of drying shrinkage

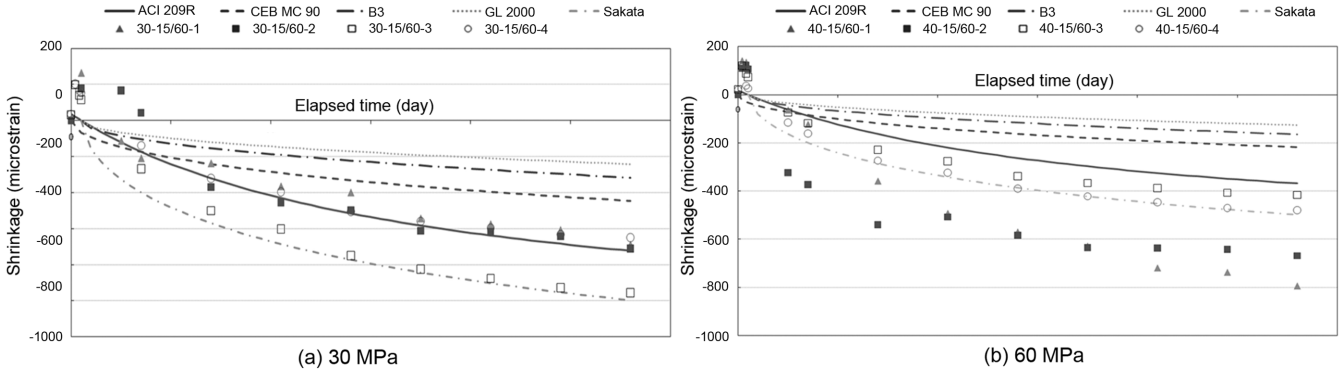

Fig. 2 Comparison of drying shrinkage test results and existing model value

시험편의 재령별 건조수축 결과를 설계강도 별로 나타내었다. 설계강도 40 MPa의 시험편이 30 MPa의 건조수축보다 크게 나타났다. 이는 단위 시멘트량이 증가함으로써 직접적으로 수축에 관여하는 시멘트 페이스트의 체적이 상대적으로 많아지고 이로 인해 수축이 크게 나타나기 때문이다. 또한 단위 시멘트량의 증가에 의한 내부 온도 상승으로 모세관 공극 내 수분의 증발이 빨리 일어난 것으로 판단된다.[22,23]

또한 설계 강도별 건조수축 실험 결과를 가장 일반적으로 사용되는 기존의 모델과 비교하여 나타내었다. 설계 강도에 대한 건조수축 예측값의 경우 ACI 209R 모델의 경우 단위 시멘트량을, CEB MC 90 모델, B3, GL 2000 모델의 경우 재령 28일의 평균 압축강도를, Sakata 모델은 단위 수량을 최대 영향 인자로 적용하고 있다.

설계강도 30 MPa의 결과를 살펴보면 Sakata 모델의 경우 그 예측값이 과대평가되었고 나머지 예측 모델은 그 예측값이 과소평가되었다. 그러나 ACI 209R 모델은 실험값과 예측값이 거의 일치하는 경향으로 나타났다. 이 중 현재 국내에서 적용하고 있는 CEB MC 90 모델의 경우 콘크리트의 건조수축에 직접적으로 영향을 미치는 양생 조건 또는 양생 기간을 고려하지 않고 콘크리트의 강도를 적용하여 과소평가되는 경향이 있다.[17] 또한 설계강도 40 MPa의 경우도 마찬가지로 동일한 경향을 나타내었다. Sakata 모델을 제외한 모델 모두 과소평가한 예측 결과가 나타났다. 특히 1999년 콘크리트 구조설계기준 개정 이전에 적용되었던 ACI 209R 모델은 건조수축량이 많은 콘크리트 즉 물-시멘트비가 낮은 고강도의 경우 과소평가되는 경향이 있다.[17] 그러나 모델을 통해 예측된 건조수축이 발생하는 경향 및 그 값이 실제 실험값과 가장 유사하다. 따라서 예측된 최종 수축량이 작고 빠른 시간내 수렴에 가까운 경향을 가지는 CEB MC 90 모델에 비해 더 적합하다고 판단된다.

3.2 줄눈 간격 산정

건조수축 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 ACI 209R 모델의 보정 계수를 적용하여 줄눈 간격을 산정하였는데 이를 위한 흐름도는 Fig. 3과 같다. 지면과 접해있는 콘크리트 슬래브(slabs on ground)의 경우 외부에 노출되어 있는 윗면과 달리 아랫면은 일정한 상대습도를 유지하고 있다고 가정한다. 따라서 구속없이 자유 수축이 발생하는 슬래브 윗면은 체적-단면적비를 고려하지 않고 노출된 환경에 대한 보정계수만을 적용한다. 식 (6)과 (7)을 통해 각각 슬래브 윗면과 아랫면에 발생하는 자유 건조수축량을 계산하였다.[24]

$$\varepsilon_{ft} = \gamma_C(\gamma_t\gamma_{RH})\varepsilon_{shu} \tag{6}$$

$$\varepsilon_{fb} = \gamma_C(\gamma_{VS}\gamma_t\gamma_{RH})\varepsilon_{shu} \tag{7}$$

여기서, ε_{shu} : 극한 수축 변형량 (mm/mm)
γ_C : 양생 기간 인자
γ_t : 건조 기간 인자
γ_{RH} : 상대 습도 인자
γ_{VS} : 체적-단면적비 인자

여기서 ε_{shu}는 극한 수축 변형량으로 기준 시험체의 수축량에 ACI 209R Committee의 보정계수를 적용하여 계산한 값으로 식 (8)에 나타내었다.[24] 기준 시험체의 일반적인 수

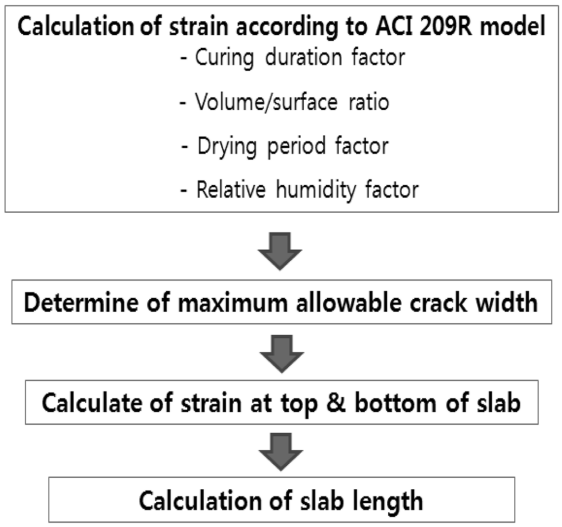

Fig. 3 Flow chart for calculation of joint spacing

축량은 780×10^{-6} 정도이고[12] 이 연구에서는 실제 재령 56일의 실험 결과값을 적용하였고 이를 수렴한 수축량으로 가정하였으며 설계 강도 30 MPa은 376×10^{-6}, 40 MPa은 590×10^{-6}을 적용하였다.

$$\varepsilon_{std} = \gamma_C \gamma_{VS} \gamma_t \gamma_{RH} \varepsilon_{shu} \tag{8}$$

여기서 ε_{std} : 기준 시험체의 자유 건조 수축량 (mm/mm)

콘크리트 슬래브 줄눈의 경우 대기와 접하고 있는 슬래브 윗면에 발생하는 최대 허용 균열폭을 제한하는 것으로 그 안정성을 평가한다. 국내의 경우 허용 균열폭을 Table 3과 같이 규정하고 있으며 이 연구에서는 콘크리트구조설계기준을 모두 만족하는 0.3 mm를 적용하였다.[1]

식 (6), (7)과 (8)을 ACI 209.2R의 자유 수축을 고려한 다음 식 (9)[24]에 적용하여 콘크리트 슬래브 표면의 줄눈 안정성을 고려한 최대 줄눈 간격을 산정하였다.

$$L = \frac{W_{cr}}{[(1-\alpha_{sr})\varepsilon_{ft} + \alpha_{sr}\varepsilon_{fb}]\left[1 - \alpha_{rr}\left(\frac{\rho n}{\rho n + 1}\right)\right]} \tag{9}$$

여기서, W_{cr} : 최대 허용 균열폭
α_{sr} : 부등 수축 구속 계수
α_{rr} : 구속 계수
ρ : 콘크리트와 철근의 단면적 비(A_s / bh)
n : 콘크리트와 철근의 탄성계수 비(E_s / E_c)

계산한 결과 설계강도 30 MPa의 경우 슬래브 두께 180 mm를 적용하였을 때 최대 줄눈 간격은 5.10 m, 설계강도 40 MPa은 5.04 m로 나타났다. 계산된 값은 현재 경험적으로 나누고 있는 줄눈 간격과 유사한 값이다. 또한 Table 4는 미국 PCA에서 제시하는 플레인 콘크리트 슬래브의 줄눈 간격으로 슬래브 두께의 24~36배를 한 값이다.[25] 경험적으로 많이 사용되는 값과 비교를 위해 슬럼프 127 mm와 슬래브 두께 175 mm를 동일하게 하였고 굵은골재 최대치수는 25 mm를 적용하였다. 그 결과 계산된 값은 각각 5.38 m와 5.29 m이고 PCA에서 제시한 값은 5.25 m로 유사하게 나타났다. 이와 같이 슬래브 두께 및 굵은골재의 최대 치수를 고려하여 경험적으로 줄눈 간격을 나누던 종래의 방법을 정량적인 식의 정립을 통해 정확한 값을 구할 수 있다.

Table 3 Maximum allowable crack width[1]

Exposure conditions	Allowable crack width (mm)
Dry air of protective membrane	0.40
Humidity, moist air, soil	0.30
Deicing chemicals	0.18
Seawater and seawater spray, wetting and drying	0.15
Water-retaining structures	0.10

Table 4 PCA recommendation for joint spacing in plain concrete[25]

Maximum joint spacing (m)				
Slab thickness (mm)	$G_{max} < 19$ mm	$G_{max} \geq 19$ mm	Calculated value	
			30 MPa	40 MPa
127	3.00	3.75	4.21	4.15
150	3.75	4.50	4.59	4.53
175	4.25	5.25	5.02	4.93
200	5.00	6.00	5.45	5.39
225	5.55	6.75	5.90	5.83
250	6.00	7.50	6.36	6.29

4. 결 론

이 연구에서는 국내 연평균 기온에 노출된 설계강도 30 MPa, 40 MPa의 콘크리트의 건조수축 실험을 실시하였고 그 결과를 기존의 모델과 비교하였다. 그 중 가장 유사한 경향을 나타내는 모델을 선정하고 이를 바탕으로 콘크리트 슬래브의 최대 줄눈 간격을 산정하였다.

1) 국내 서울 지역 연평균 기온 중 가장 많은 빈도수를 나타낸 온도 15°C, 상대습도 60%에 노출된 콘크리트 시험편의 재령별 건조수축 결과 설계 강도 40 MPa의 시험편이 30 MPa의 건조수축보다 크게 나타났다. 이는 단위 시멘트량이 증가함으써 직접적으로 수축에 관여하는 시멘트 페이스트의 체적이 상대적으로 많아지고 이로 인해 수축이 크게 나타나기 때문이다. 또한 단위 시멘트량의 증가에 의한 내부 온도 상승으로 모세관 공극 내 수분의 증발이 빨리 일어난 것으로 판단된다.
2) 설계 강도별 건조수축 실험 결과를 ACI 209R 모델, CEB MC 90 모델, B3 모델, GL 200모델 그리고 Sakata 모델과 비교한 결과 Sakata 모델을 제외한 나머지 모델은 실제 실험값에 비해 과소평가되는 경향으로 나타났다. 그러나 실제 실험값은 ACI 209R 모델 예측값과 동일한 경향을 나타냈으며 특히 설계강도 30 MPa의 경우 ACI 209R 모델과 거의 일치하는 경향으로 나타났다.
3) 실험 결과와 유사한 ACI 209R 모델의 보정 계수를 실제 실험값에 적용하여 최대 줄눈 간격을 산정하였다. 그 결과 현재 경험적으로 적용되고 있는 줄눈 간격과 유사한 값이 나타났으며 이는 PCA에서 제시하는 줄눈 간격과도 유사한 값으로 나타났다. 이로 인해 경험적으로 줄눈 간격을 나눠오던 종래의 방법을 정량적인 수식으로 정립하여 정확하게 산정할 수 있다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 기문당, 2005, 844 pp.
2. 이홍재, “팽창줄눈 간격의 이론적 산정,” 중앙대학교 건

설대학원 석사논문, 1999.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 2008, 523 pp.
4. 한국도로공사, 도로설계요령, 2002.
5. 국토해양부, 도로설계편람, 2000.
6. ACI 224.3R-95, *Joints in Concrete Construction*, American Concrete Institute, ACI Committee 224, pp. 2~3.
7. ACI 360R-06, *Design of Slabs-on-Ground*, ACI Committee 360, pp. 23~28.
8. ACPA, *Design and Construction of Joints for Concrete Streets*, American Concrete Pavement Association, 1992, IS061.01P, pp. 1~12.
9. ACI 302.1R-96, *Guide for Concrete Floor and Slab Construction*, ACI Committee 302, 10 pp.
10. Bogemconcrete.com/Concrete-tips, *Concrete Parking Area Construction.*
11. Bazant Z. P., "Prediction of Concrete Creep and Shrinkage: Past, Present and Future," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 203, 2001, pp. 27~38.
12. ACI 209R-92, *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure*, American Concrete Institute, ACI Committee 209, 6 pp.
13. CEB-FIP Model Code 1990, *Comite Euro International Du Beton*, 1991, 57 pp.
14. Bazant, Z. P. and Kim, J. K., "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete : Part 1-Shrinkage," *Materials and Structures*, Vol. 24, 1991, pp. 327~345.
15. Gardner, N. J. and Lockman, M. J., "Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 2, 2001, pp. 159~167.
16. Sakata, K., "Prediction of Concrete Creep and Shrinkage, Creep and Shrinkage of Concrete," *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium*, London, UK, 1993, pp. 649~654.
17. ACI 209.2R-08, *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*, ACI Committee 209, 16 pp.
18. McDonald, D. B. and Roper, H., Accuracy of Prediction Model for Shrinkage of Concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 90, 1993, pp. 265~271.
19. Akthem, Al-M. and Lam, J. P., "Statistical Evaluation of Shrinkage and Creep Models," *ACI Material Journal*, Vol. 102, No. 3, 2005, pp. 170~176.
20. 전쌍순, 박태균, 황택진, 엄장섭, 진치섭, "콘크리트 크리프와 건조수축의 CEB-FIP 모델코드와 ACI 코드의 비교," 부산대학교 생산기술연구소논문집, 61권, 2002, pp. 63~73.
21. Bazant, Z. P. and Li, G. H., "Unbiased Statistical Comparison of Creep and Shrinkage Prediction Models," *ACI Material Journal*, Vol. 105, No. 6, 2008, pp. 610~622.
22. ACI 308-81, *Standard Practice for Curing Concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, Part 2, ACI Committee 308, 2001.
23. Bazant, Z. P. and Xi, Y., "New Test Method to Separate Microcracking from Drying Creep: Curvature Creep at Equal Bending Moment and Various Axial Forces, Creep and Shrinkage of Concrete," *Proceeding of the Fifth International RILEM Symposium*, 1993, pp. 77~82.
24. Miltenberger, M. A. and Attiogbe, E. K., "Shrinkage-Based Analysis for Control Joint Spacing in Slab on Ground," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 3, 2002, pp. 352~359.
25. Tarr, S. M. and Farny, J. A., *Concrete Floors on Ground*, Portland Cement Association, 4th Edition, 2008, pp. 91~109.
26. Merril, W. S., "Prevention and Control of Cracking in Reinforced Concrete Building," *Engineering News-Record*, Vol. 131, No. 23, 1943, pp. 91~93.
27. Fintel, M., *Joints in Building,* Handbook of Concrete Engineering, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1974, pp. 94~110.
28. Wood, R. H., "Joints in Sanitary Engineering Structures," *Concrete International*, Vol. 3, No. 4, 1981, pp. 53~66.

요 약 콘크리트 슬래브의 수축으로 인해 발생하는 응력에 의한 무분별한 균열을 억제하기 위해 줄눈을 설치한다. 그러나 설치된 줄눈의 간격은 구체적인 산출 근거나 정량적인 기준 없이 경험적으로 나누어지고 있다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트 슬래브의 수축 응력에 의한 변형량을 측정하고 이에 따른 정량적인 평가 기준을 제시하고자 한다. 노출된 환경 조건은 온도 15°C, 상대습도 60%를 적용하였다. 건조수축 실험은 현재 슬래브 설계에 많이 사용되는 설계강도 30 MPa 및 40 MPa 배합을 사용하였고 그 결과를 기존 건조수축 모델에 적용하였다. 그 결과 ACI 209R 모델에 가장 일치하는 것으로 나타났으며 이를 바탕으로 콘크리트 슬래브의 정량적인 줄눈 간격을 산정하였다.

핵심용어 : 콘크리드 건조수축, 슬래브, 줄눈 간격